

УДК 534.1: 629.73

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И РЕСУРС КОНСТРУКЦИИ С ДИСКРЕТНЫМИ СВАРНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ ПРИ СТАЦИОНАРНЫХ СЛУЧАЙНЫХ КОЛЕБАНИЯХ

Рыбаулин А.Г.* , Сидоренко А.С.**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

** e-mail: artcomj@gmail.com*

*** e-mail: k906@mai.ru*

Представлены результаты разработки численной модели и данные расчетной оценки характеристик напряженного состояния и долговечности конструкции авиационного изделия с точечными сварными соединениями при случайной вибрации. Для обоснования корректности моделирования точечного сварного соединения проведены расчетные исследования для моделей образцов точечных сварных соединений, испытанных на статическую прочность при нагружении на отрыв и на срез. При моделировании случайной вибрации авиационного изделия рассматривается действие случайной кинематической нагрузки в условиях эксплуатации изделия на подвеске маневренного носителя. Построены спектральные характеристики вибронпряжений в различных точках конструкции изделия, и определены зоны и уровни максимальных напряжений. Выявлены особенности динамического напряженного состояния в сварных соединениях. Получены оценки удельной повреждаемости сварного соединения по различным теориям накопления усталостных повреждений.

Ключевые слова: дискретное сварное соединение, точечная сварка, случайная вибрация, конечно-элементное моделирование, динамическое напряженное состояние, спектральная плотность, усталостная прочность, усталостная долговечность.

Введение

Использование дискретных (точечных) сварных соединений в тонкостенных конструкциях часто обусловлено весовыми ограничениями. Помимо этого, применение таких соединений, по сравнению с аналогичными заклепочными, повышает производительность сборки и снижает ее стоимость, устраняет нарушение целостности соединяемых деталей.

При этом сварные точки являются зонами повышенной концентрации напряжений, которая образуется вследствие неравномерности нагрева в процессе сварки и существенного отличия механических характеристик материала в зонах точечных сварных соединений от характеристик основного материала [1–3]. При колебаниях конструкции в этих зонах наиболее вероятно появление усталостных трещин, образующихся между свариваемыми

элементами на контуре сварной точки. Таким образом, усталостная долговечность конструкций, содержащих дискретные сварные соединения, в основном определяется характеристиками динамического напряженного состояния в локальных зонах сварных точек. Для корректной оценки долговечности таких конструкций необходимо определять характеристики динамического напряженного состояния с учетом его существенной пространственной неравномерности и локальных изменений свойств материала.

Экспериментальное определение локального динамического напряженного состояния в зонах сварных точек — весьма сложное и не всегда возможно, поэтому рациональным методом исследований здесь является использование численных моделей [4, 5].

В настоящей работе представлены методика и результаты расчетного определения вероятностных характеристик локального динамического напряженного состояния конструкции с точечными сварными соединениями при случайной вибрации с использованием конечно-элементного моделирования. Выполняются моделирование напряженного состояния и последующая оценка усталостной долговечности конструкции в наиболее нагруженных зонах соединения. Новизной исследований является подробное моделирование динамического напряженного состояния с учетом существенного изменения свойств основного материала по сечению сварной точки на основе эмпирических зависимостей предела текучести материала в локальных зонах сварной точки от микротвердости, а также определение среднего ресурса сварного соединения на основе различных теорий накопления усталостных повреждений.

Разработанная методика численного моделирования локального динамического напряженного состояния может быть применена для оценки вибрационной прочности тонкостенных конструкций с дискретными сварными соединениями.

Формирование конечно-элементных моделей сварного соединения

На первом этапе формирования конечно-элементных моделей (КЭМ) конструкции с дискретными сварными соединениями проводилось моделирование статического напряженного состояния образцов из листовой стали с точечным сварным соединением при испытаниях на отрыв и на срез [6]. Образцы были выполнены в виде соединения двух прямоугольных полосок шириной 25 мм и толщинами 2,5 и 2 мм. Образец для испытаний на отрыв состоял из двух П-образно согнутых поло-

сок длиной 80 мм, образец для испытаний на срез — из двух прямых полосок длиной 150 мм. Одна из полосок закреплялась, к другой прикладывалась квазистатическая растягивающая сила, нарастающая до разрушения сварного соединения. В качестве предельного (разрушающего) значения растягивающей силы принималась ее величина, при которой максимальная относительная деформация в сварной точке достигала 5%, что соответствует предельной относительной деформации материалов образцов. КЭМ образцов строились с использованием объемных твердотельных элементов типа SOLID. Сварная точка моделировалась в виде двух отдельных полуэллиптических тел с характерным размером конечного элемента 0,2 мм, диаметр сварной точки принимался равным 5 мм, что соответствовало реальному образцу. КЭМ сварной точки содержит около 14000 конечных элементов.

Для материала образцов принималась билинейная диаграмма деформирования. Значения механических характеристик материала в зоне сварных точек далее пересчитывались по характеристикам исходного материала на основе данных измерений микротвердости по сечению сварных точек [7]. Для этого использовалось соотношение между пределом текучести $\sigma_{0,2}$ и твердостью на пределе текучести $H_{0,2}$ [8]:

$$\sigma_{0,2} = cH_{0,2},$$

где c — коэффициент пропорциональности, учитывающий переход от напряженного состояния на пределе текучести при растяжении к схеме напряженного состояния при вдавливании стального сферического индентора для измерения твердости [9]. Для относительно мягких металлов ($\sigma_{0,2} < 78,5$ — 500 МПа) коэффициент $c < 0,333$, для более твердых металлов ($\sigma_{0,2} > 500$ — 3825 МПа) коэффициент $c > 0,333$. Наиболее существенное увеличение коэффициента c наблюдается у металлов с пределом текучести больше 700 МПа [8]. Характер изменения микротвердости по диаметральному сечению сварных точек показан на рис. 1.

Твердость на пределе текучести $H_{0,2}$ в МПа определяется по ГОСТ 22762-77 (табл. 1 и 2) или вычисляется по формуле [10]

$$H_{0,2} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} = 156,9 \frac{P_{0,2}}{D^2},$$

где D — диаметр сферического индентора, мм; $P_{0,2}$ — сила вдавливания индентора на пределе те-

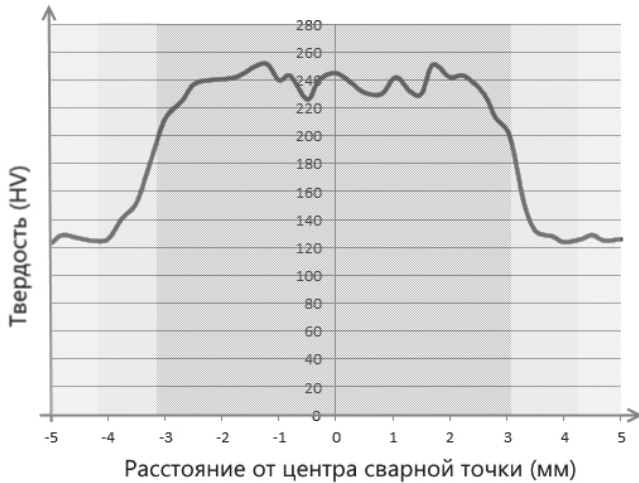


Рис. 1. Изменение микротвердости (HV) по сечению сварной точки

кучести, H ; d — диаметр отпечатка, мм; P — нагрузка, Н, соответствующая диаметру отпечатка $d = 0,09 \cdot D$.

Для образца, который испытывался на отрыв, в силу двойной симметрии образца и условий нагружения рассматривалась четверть модели образца (рис. 2). Максимальные эквивалентные напряжения

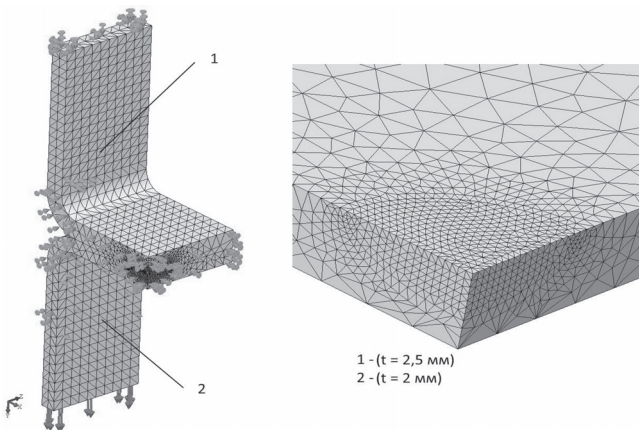
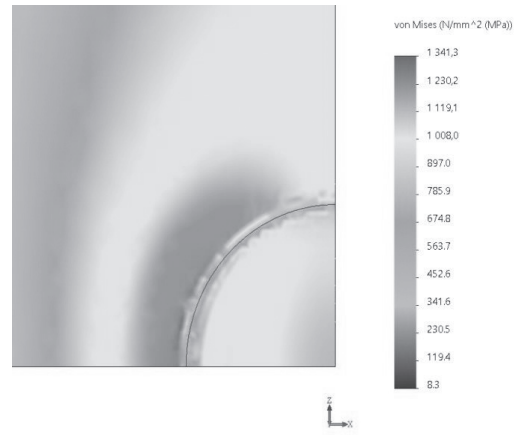


Рис. 2. Расчетная модель образца для испытаний на отрыв

получены на контуре сварной точки в материале с толщиной 2 мм (рис. 3).

КЭМ образца для испытаний на срез строилась аналогично КЭМ образца для испытаний на отрыв. В силу симметрии моделировалась половина образца (рис. 4). Максимальные значения эквивалентных напряжений получены на контуре сварной точки в материале толщиной 2,5 мм (рис. 5).

Относительное расхождение значений предельных нагрузок, полученных в эксперименте и при численном моделировании напряжений в сварной точке для рассматриваемых случаев нагружения, составляет 3—5%.



2 - ($t = 2$ мм)

Рис. 3. Уровни эквивалентных напряжений в образце на отрыв

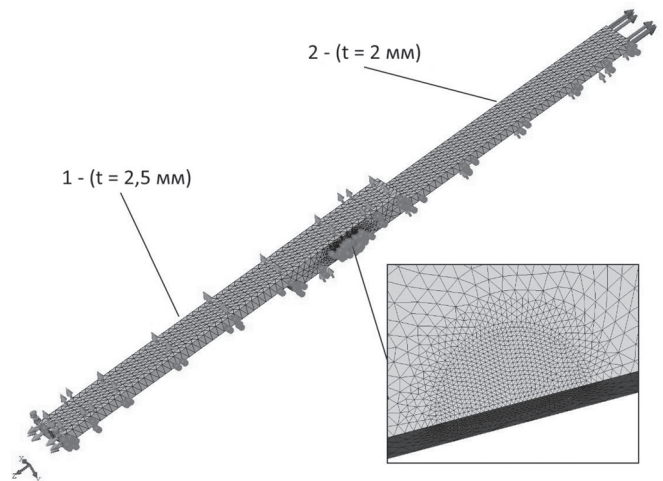
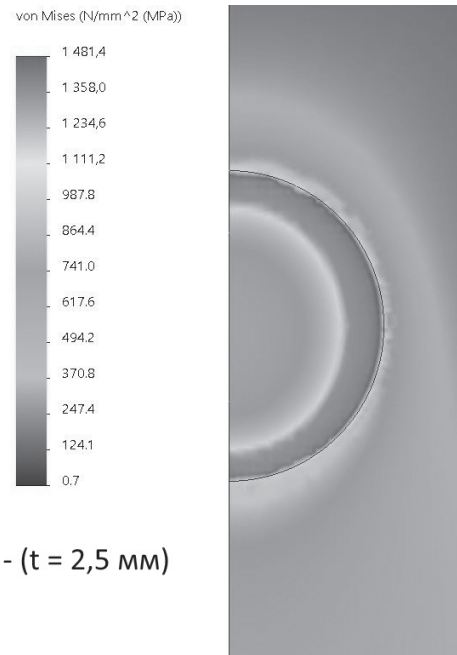


Рис. 4. Расчетная модель образца для испытаний на срез



1 - ($t = 2,5$ мм)

Рис. 5. Уровни эквивалентных напряжений в образце на срез

Далее проводится моделирование несущей конструкции авиационного изделия, содержащей сварные соединения. Конструкция выполнена в виде тонкостенной стальной цилиндрической оболочки с двумя вложенными внутрь упругими заполнителями в форме цилиндров различной плотности. На оболочке с помощью двух однорядных точечных сварных швов закреплены четыре крестообразно расположенных плоскости под углом ± 45 градусов (рис. 6). Плоскость представляет собой штампован-

второго порядка. Элементы SOLID использованы для построения КЭМ плоскостей, узлов подвески и упругого заполнителя, элементы SHELL — для КЭМ оболочки изделия. В качестве глобальной системы координат принята прямоугольная правосторонняя система координат. Начало координат расположено в центре окружности задней части конструкции. Ось X совпадает с продольной осью изделия и направлена по полету, ось Y направлена вверх.

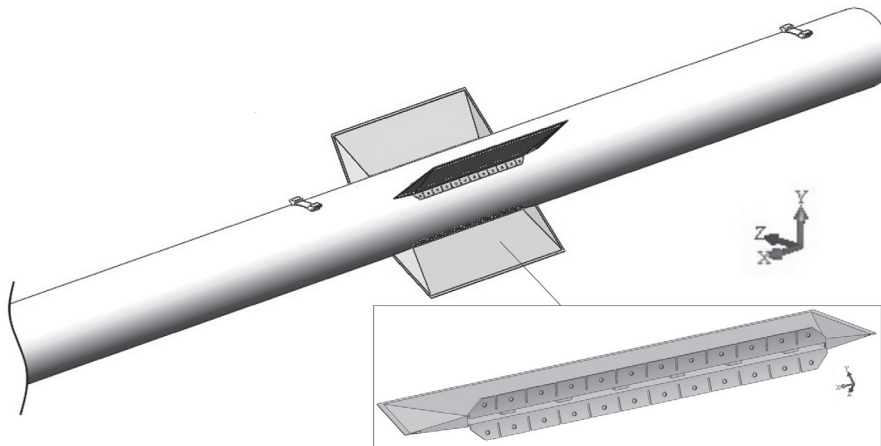


Рис. 6. Геометрическая модель изделия и плоскости

ный каркас с обшивкой из тонких листов стали, с массивными элементами в корне, а также кронштейнами, с помощью которых плоскость крепится к оболочке посредством точечного сварного соединения.

Исходными данными для моделирования являются геометрические характеристики и распределение массы элементов и соединений конструкции, условия ее закрепления, механические характеристики материалов как в конструкции в целом, так и в локальных зонах сварных соединений.

Условия закрепления соответствуют реальному соединению изделия с носителем: задний по полету узел подвески жестко закреплен по всем направлениям, а передний может смещаться только в направлении продольной оси изделия.

Численное моделирование динамического и напряженного состояний конструкции изделия с учетом сварных соединений и конструктивных особенностей узлов подвески проводится на основе методики [11], позволяющей описывать деформирование конструкции в локальных зонах нерегулярностей. Для моделирования используется универсальная система твердотельного моделирования и конечно-элементного расчета SolidWorks [12, 13]. КЭМ конструкции формируется с использованием конечных элементов (КЭ) типа SOLID и SHELL

Для формирования КЭМ сварных точек в геометрической модели плоскостей формируются отверстия, которые далее заполняются тремя концентрическими цилиндрическими телами (рис. 7).

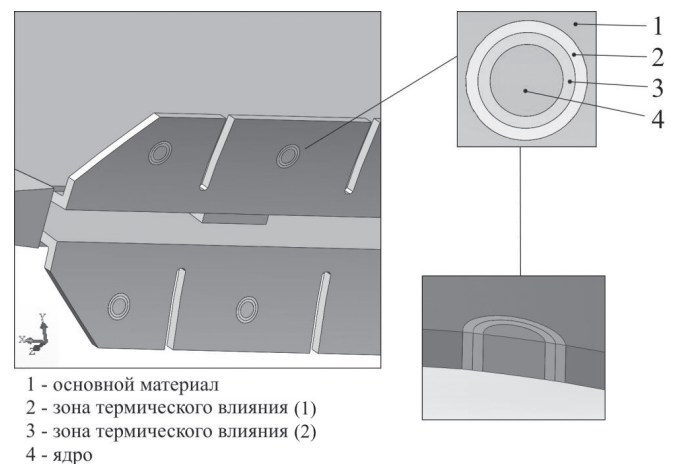


Рис. 7. Геометрическая модель сварной точки на плоскости и расположение зон материала в сварной точке

Приведенные механические характеристики материала в зонах сварных точек определялись в соответствии с распределением твердости материала по сечению сварной точки [11] по методике, изложенной в [8, 10]. Приведенные пределы текучести

материала $\sigma_{т.п}$ в зонах точечного сварного соединения даны в таблице.

№ зоны сварной точки	1	2	3	4
$\sigma_{т.п}$, МПа	833,6	877,0	938,4	1546,1

Построенные сварные точки на плоскостях далее соединялись с оболочкой контактным условием «связанные», при котором поверхностные области сварных точек не имеют взаимных относительных перемещений. Модель каждой из сварных точек содержит до 350 элементов SOLID второго порядка, в том числе до 70 конечных элементов на поверхности контакта. Общее число узлов в модели конструкции составило 322514, элементов — 171001.

Результаты расчетного анализа напряжений в сварном шве

Расчетные исследования динамического и напряженного состояний конструкции изделия выполнены для случая нагружения, при котором колебания конструкции вызываются кинематическим возбуждением в форме стационарного случайного процесса ускорения узлов подвески с заданной спектральной плотностью. Для процесса ускорения принята спектральная плотность, соответствующая реальному эксплуатационному нагружению в диапазоне частот 0—140 Гц.

Динамический расчет конструкции выполняется с применением алгоритмов модального анализа

для случайных процессов. Демпфирующие свойства конструкции задаются характеристиками демпфирования для каждой моды.

Определены среднеквадратические значения (СКЗ), спектральные плотности и дисперсии эквивалентных напряжений в сварном соединении. Показано, что в силу симметрии конструкции и условий кинематического нагружения изделия уровни напряжений для всех плоскостей одинаковы.

Получено, что максимальные значения СКЗ напряжений (215,4 МПа) наблюдаются на оболочке изделия в районе переднего узла подвески. Наибольшие значения СКЗ напряжений в сварном шве наблюдаются на поверхности крайних сварных точек, близких к переднему узлу подвески.

Распределение напряжений в зоне наиболее нагруженной сварной точки имеет значительную неравномерность (рис. 8). Максимальные напряжения наблюдаются в зоне термического влияния (переходной зоне) (см. рис. 7). Это соответствует данным публикаций [14—16], в которых на основании экспериментов показано, что разрушение в сварной точке чаще всего происходит именно вблизи контура сварной точки с образованием трещин или с вырывом более тонкого материала по периметру сварной точки.

Максимальное значение СКЗ напряжений получено в узле 176261 КЭМ, расположенном в зоне термического влияния сварной точки, практически на ее контуре (рис. 8), что согласуется с результатами моделирования, проведенного для случая статического нагружения. Спектральная плотность $S_{\sigma}(f)$ и распределение дисперсии напряжений

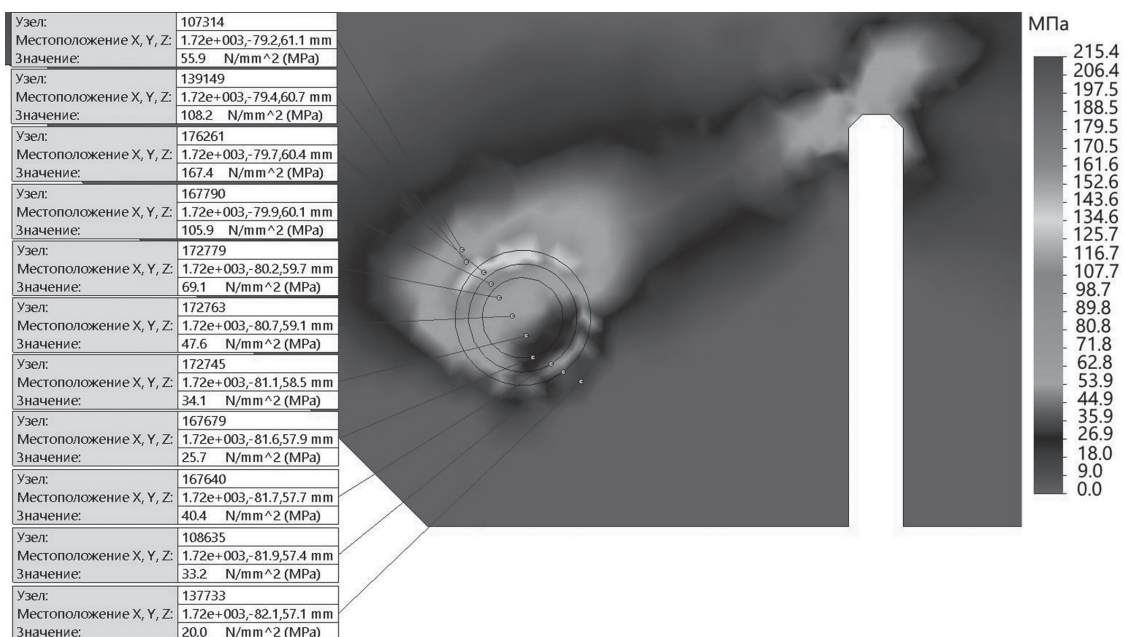


Рис. 8. Распределение СКЗ напряжений в сварной точке

$D_{\sigma}(f)$ по частотному диапазону для узла 176261 представлено на рис. 9 и 10 соответственно.

реализаций соответствующих случайных процессов проводится восстановление этих процессов с ис-

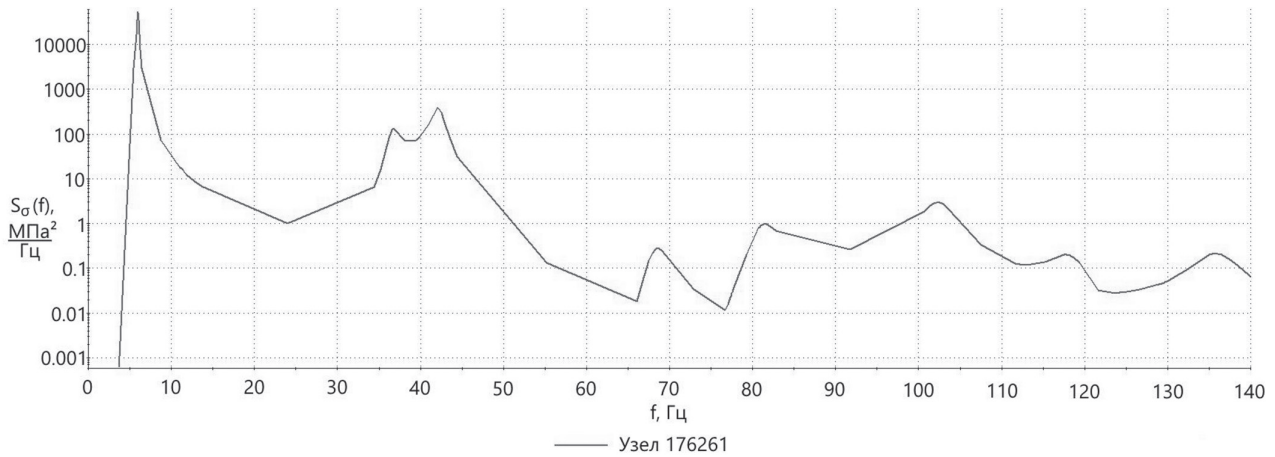


Рис. 9. Спектральная плотность напряжений в узле 176261

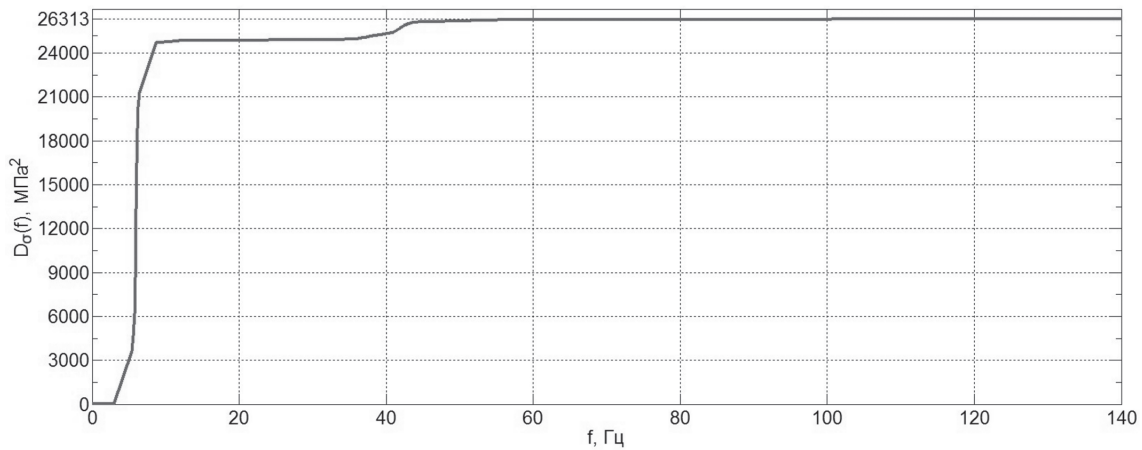


Рис. 10. Распределение дисперсии напряжений в узле 176261

Оценка ресурса сварного соединения

В силу существенного разброса показателей долговечности конструкций для оценки ресурса принято использовать различные теории (гипотезы) с последующим анализом результатов. Наиболее часто оценка ресурса проводится на основе линейной теории суммирования усталостных повреждений. Для ее применения требуется приведение действующего нерегулярного процесса напряжений к эквивалентному по повреждающему действию регулярному процессу, т.е. для проведения расчетов необходимы реализации процессов напряжений в наиболее нагруженных точках конструкции.

При решении задач статистической динамики конструкций с использованием модального анализа и метода спектральных представлений основным результатом решения являются спектральные плотности неизвестных реакций конструкции (перемещений, ускорений, напряжений). Для получения

пользованием алгоритмов статистического моделирования.

Здесь исходными данными для получения реализаций случайных процессов напряжений $\sigma(t)$ являются зависимости для спектральных плотностей напряжений $S_{\sigma}(\omega)$. Для каждого значения аргумента (времени) t процесс $\sigma(t)$ моделируется разложением вида [17]

$$\sigma(t) = \sum_0^N [S_{\sigma}(\omega_j) \Delta\omega_j]^{1/2} \cos(\omega'_j + \alpha_j), \quad (1)$$

где ω_j — дискретные значения частоты на графике спектральной плотности напряжений, рад/с; $S_{\sigma}(\omega_j)$ — соответствующие им значения спектральной плотности; $\omega'_j = (\omega_j + \delta\omega_j)$; $\delta\omega_j$ — случайные флуктуации частоты, определяемые как взаимно

независимые случайные величины, равномерно распределенные в интервале $[-\Delta\omega/2, \Delta\omega/2]$ с плотностью вероятности $1/\Delta\omega$; α_j — независимые случайные величины, равномерно распределенные в интервале $[0, 2\pi]$; $\omega = 2\pi f$.

При увеличении количества слагаемых N распределение значений реализаций, полученных по алгоритму (1), приближается к нормальному распределению.

Моделирование реализаций процессов напряжений проводится для точек сварного соединения с наибольшим уровнем напряжений. Здесь моделирование проведено для точки соединения, соответствующей узлу 176261 КЭМ, в которой основная часть энергии процесса сосредоточена в диапазоне частот $[5,4; 6,4]$ (см. рис. 9), т.е. процесс напряжений $\sigma(t)$ является узкополосным. Поэтому при моделировании рассматриваются только два частотных интервала $[5,4; 6,4]$, $[24; 44,4]$, в которых расположены составляющие спектральной плотности напряжений, вносящие основной вклад в суммарную дисперсию напряжений. В границах выделенных интервалов с шагом по частоте $\Delta\omega_j$ задаются значения ω_j и соответствующие им значения $S_\sigma(\omega_j)$. Шаг $\Delta\omega_j$ является переменным, значения аргументов ω_j сгущаются вблизи максимумов спектральной плотности. Для первого слагаемого суммы (3) принимается $\Delta\omega_1 = \omega_2 - \omega_1$, для последующих слагаемых $\Delta\omega_j = (\omega_j - \omega_{j-1})/2 + (\omega_{j+1} - \omega_j)/2$.

Моделирование реализаций проводится отдельно для каждого частотного интервала с последующим суммированием значений $\sigma(t)$ в совпадающие

моменты времени. Значения частоты ω_j и соответствующие значения спектральной плотности напряжений $S_\sigma(\omega_j)$ определяются по графику спектральной плотности. Далее устанавливается длина реализации T и выбирается шаг дискретизации по времени Δt .

Процессы для отдельных интервалов содержат гармоники, существенно различающиеся по частоте и уровню, что соответствует характеру исходной спектральной плотности (см. рис. 9). Участок суммарной реализации процесса $\sigma(t)$ длительностью 20 с представлен на рис. 11.

В соответствии с алгоритмом моделирования значения процесса напряжений $\sigma(t)$ имеют распределение, близкое к нормальному, и с вероятностью, близкой к единице, не должны превышать величину $3D_\sigma^{1/2}$, где D_σ — суммарная дисперсия процесса. На рис. 11 видно, что превышение уровня $3D_\sigma^{1/2} = 487$ МПа является редким, что показывает корректность моделирования процесса.

Реализации случайных процессов напряжений, полученные в результате моделирования, далее схематизируются, т.е. приводятся к набору регулярных циклов, эквивалентных по повреждающему действию случайному процессу. Для схематизации случайного процесса здесь применяется метод «дождя» [18], который наряду с методом полных циклов дает наиболее приемлемые оценки долговечности [19]. В алгоритм схематизации вводятся значения времени t и соответствующие им значения случайного процесса напряжений $\sigma(t)$ (рис. 11).

В результате вычислений получены графики функции удельной повторяемости (за 60 с) ампли-

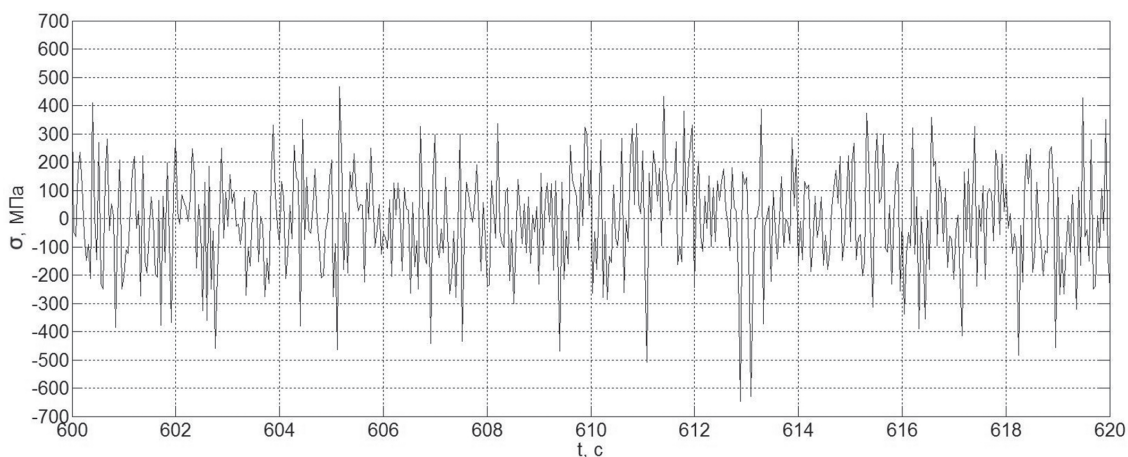


Рис. 11. Суммарная временная реализация $\sigma(t)$ (длительность 20 с)

туд приведенных симметричных циклов напряжений (рис. 12).

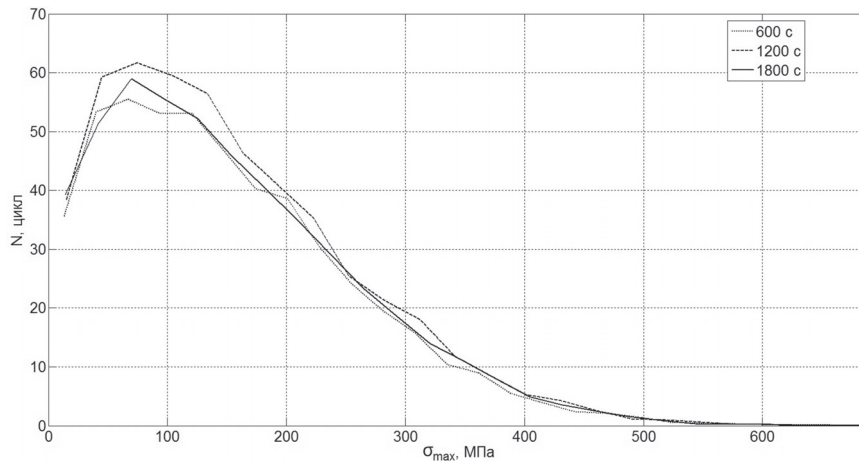


Рис. 12. Удельная повторяемость амплитуд циклов напряжений

Эти графики соответствуют участкам реализации различной продолжительности (600, 1200 и 1800 с) и показывают сходимость результатов схематизации при увеличении продолжительности реализации. Наиболее важной является сходимость повторяемости амплитуд в области значений напряжений, превышающих предел ограниченной выносливости для рассматриваемого элемента конструкции.

Для оценки долговечности используется линейная гипотеза суммирования повреждений, в которой условие усталостного разрушения имеет вид

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1, \quad (2)$$

где n_i и N_i — количество циклов напряжений с амплитудой σ_{a_i} и количество циклов напряжений

с амплитудой σ_{a_i} до появления усталостного разрушения; k — число ступеней регулярных циклов напряжений. При этом не учитываются циклы напряжений с амплитудой меньше, чем принятый предел выносливости для данного конструктивно-го элемента.

Значения n_i определяются по кривой повторяемости для реализации процесса напряжений продолжительностью 1800 с. Далее для соответствующих значений напряжений σ_i с использованием приведенной кривой усталости для материала в зоне сварной точки определяются значения N_i . Приведенная кривая усталости строится на основе характеристик кривой усталости для стандартного образца с учетом изменения свойств материала в свар-

ном соединении и влияния различных факторов на сопротивление усталости.

Свариваемые детали изготовлены из стали 30ХГСА. Для стандартного образца из листовой стали 30ХГСА принимается [20]:

$$N_G = 7 \cdot 10^5; m_N = 8,58; m_{N_1} = 64,92; \sigma_{N_G} = 460 \text{ МПа},$$

где N_G и σ_{N_G} — координаты точки перелома; m_N

и m_{N_1} — показатели наклона левой и правой ветвей кривой усталости. Для приведенной кривой усталости принимается значение абсциссы точки перелома $N_{G,n} = N_G = 7 \cdot 10^5$. Ордината точки пере-

лома для приведенной кривой усталости $\sigma_{N_{G,n}}$ оп-

ределяется по формуле

$$\sigma_{N_{G,n}} = \sigma_{N_G} / K, \quad (3)$$

где $\sigma_{N_{G,n}}$ — медианное значение предела ограниченной выносливости для элемента конструкции;

σ_{N_G} — медианное значение предела ограниченной выносливости для стандартного образца; K — коэффициент снижения предела выносливости.

Для определения коэффициента K используется формула [21]

$$K = \left(\frac{K_\sigma}{K_{d_\sigma}} + \frac{1}{K_{F_\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_v \cdot K_A}. \quad (4)$$

Здесь K_σ — эффективный коэффициент концентрации напряжений; K_{d_σ} — масштабный фактор;

$K_{F\sigma}$ — коэффициент влияния шероховатости поверхности; K_v — коэффициент влияния поверхностного упрочнения; K_A — коэффициент анизотропии.

Для коэффициентов в формуле (4), в соответствии со стандартом [21], принимается: $K_{F\sigma} = 0,95$;

$K_v = 1,0$; $K_A = 0,9$; $K = 1,2$. Так как приведенная кривая формируется непосредственно для элемента в сварной точке с максимальным уровнем напряжений, то отношение $K_{\sigma}/K_{d\sigma}$ принимается равным 1. Тогда $N_{G,n} = 376$ МПа.

С использованием полученных кривых повторяемости (рис. 12) и соотношения линейной гипотезы суммирования повреждений (2) получено, что удельная относительная повреждаемость (за один час эксплуатации изделия) точечного сварного соединения при возбуждении колебаний конструкции случайным стационарным процессом со спектральной плотностью ускорения, соответствующей реальному эксплуатационному нагружению, составляет 1,17 %, а усталостная долговечность — 86 часов.

Экспериментально установлено, что использование линейной гипотезы суммирования повреждений дает существенно заниженную оценку накопленной усталостной повреждаемости [19]. Более точная оценка накопленной повреждаемости может быть получена на основе скорректированной линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений, в которой условие разрушения имеет вид [19]

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = a_p; \quad a_p = \sum_{i=1}^k \frac{\sigma_{a_i}}{\sigma_{a_{\max}}} \cdot \frac{v_{i\sigma}}{v_{\sigma}^*}, \quad (5)$$

где k — число ступеней амплитуд напряжения; σ_{a_i} — среднее значение амплитуды напряжения для i -й ступени; $\sigma_{a_{\max}}$ — максимальное значение амплитуды напряжения; $v_{i\sigma}$ — число повторений амплитуд напряжений σ_{a_i} ; v_{σ}^* — суммарное число циклов.

Для функции повторяемости напряжений, соответствующей длительности реализации 1800 с, получено значение корректировочного коэффициента $a_p = 0,23$. Тогда значение удельной повреждаемости точечного сварного соединения составляет 5,08 %, а усталостная долговечность — 19,7 часа.

Применение линейной гипотезы суммирования повреждений для оценки усталостной долговечности при случайных колебаниях требует процедуры приведения случайного процесса напряжений к эквивалентному по повреждающему действию регулярному процессу. Для формирования регулярного процесса используются различные методы: «дождя», максимумов, амплитуд, полных циклов и т.д.

Так как результатом решения задачи о случайных колебаниях методом спектральных представлений являются спектральные плотности реакции, то необходимо также по спектральным плотностям восстанавливать соответствующие случайные процессы с использованием алгоритмов статистического моделирования.

Непосредственное вычисление характеристик долговечности по спектральной плотности напряжений без моделирования случайного процесса возможно на основе алгоритмов теории спектрального суммирования усталостных повреждений [22, 23].

В рамках этой теории средняя накопленная удельная (в единицу времени) повреждаемость, вызванная действием стационарного нормального случайного процесса напряжений, определяется по формуле

$$\xi = \frac{1}{2\pi C} D_{\sigma}^{m/2} L(m) \left[\int_{\omega} \bar{\Phi}(\omega) \omega^{2/m} d\omega \right]^{m/2}. \quad (6)$$

Тогда для медианной долговечности \bar{T} имеет место соотношение

$$\bar{T} = \frac{2\pi C}{D_{\sigma}^{m/2} L(m) \left[\int_{\omega} \bar{\Phi}(\omega) \omega^{2/m} d\omega \right]^{m/2}}. \quad (7)$$

В выражениях (6) и (7):

$\bar{\Phi}(\omega)$ — нормированная спектральная плотность, $\bar{\Phi}(\omega) = \frac{S_{\sigma}(f)}{2\pi D_{\sigma}}$;

$L(m)$ — функция показателя степени кривой усталости m , $L(m) = (\sqrt{2})^m \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right)$;

Γ — гамма-функция;

C — параметр уравнения кривой усталости, $C = N\sigma^m$.

Вычисление интеграла от сложной функции, включающей спектральную плотность напряжений в формулах (6), (7), в общем случае проводится с

использованием численных алгоритмов. Для спектральной плотности напряжений в сварной точке (см. рис. 9) интегрирование можно приближенно проводить только для частотных интервалов, соответствующих основным пикам зависимости $\bar{\Phi}(\omega)$, в которых сосредоточена практически вся энергия процесса напряжений. В первом приближении эти сложные пики можно заменить равными по площади прямоугольниками с аналогичной шириной частотных интервалов. Тогда выражение (7) для средней долговечности будет иметь вид

$$\bar{T} = \frac{2\pi C}{L(m) \left[h \int_{\omega} \omega^{2/m} d\omega \right]^{m/2}}, \quad (8)$$

где $h = D_{\sigma} / \omega$; D_{σ} — суммарная дисперсия процесса напряжений; ω — частотный интервал, рад/с. Соответствующее среднее относительное значение удельной повреждаемости точечного сварного соединения (соответствующее одному часу эксплуатационного нагружения) равно 0,28 %. Соответствующее значение усталостной долговечности составляет 357 часов.

Если пики спектральной плотности более подробно описываются с помощью линейных функций частоты, то для той же сварной точки значение удельной повреждаемости будет равно 0,25 %, соответствующее значение усталостной долговечности — 400 часов.

Таким образом, оценки долговечности, полученные по различным теориям, существенно различны. Минимальную оценку дает скорректированная линейная теория, максимальную — гипотеза спектрального суммирования.

Следует отметить, что расчет долговечности по теории спектрального суммирования ведется с учетом только левой ветви кривой усталости, а расчет с применением гипотезы линейного суммирования повреждений — с учетом левой и правой ветвей кривой усталости.

Выводы

На основе разработанной методики численного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций авиационных изделий, имеющих дискретные (точечные) сварные соединения, при действии случайного кинематического возбуждения обоснована и сформирована КЭМ конструкции реального изделия, позволяющая учитывать нерегулярности НДС конструкции в локальных зонах сварных соединений.

На основе экспериментальных данных и результатов численного моделирования статического НДС сварной точки сформирована КЭМ сварной точки, учитывающая изменение механических свойств материала в зависимости от величины его твердости в зоне термического влияния сварного соединения.

Проведены расчетные исследования напряженного состояния изделия при случайном кинематическом нагружении с заданной спектральной плотностью. Выявлены зоны концентрации напряжений в дискретных сварных соединениях. Получены распределения СКЗ эквивалентных напряжений в наиболее нагруженной точке сварного шва, и определены уровни максимальных напряжений. Показано, что наибольшие значения напряжений наблюдаются в переходной зоне контакта точечного сварного соединения.

Определены спектральные плотности и распределения дисперсии напряжений для наиболее напряженного КЭ сварной точки. Выявлены особенности распределения дисперсии напряжений по частотному диапазону.

На основе алгоритмов статистического моделирования построены временные реализации напряжений в наиболее нагруженной сварной точке конструкции и кривые удельной повторяемости амплитуд приведенных регулярных циклов напряжений.

На основе линейной теории суммирования повреждений и гипотезы спектрального суммирования усталостных повреждений получены оценки долговечности конструкции авиационного изделия со сварными соединениями при случайной эксплуатационной вибрации. Минимальную оценку дает скорректированная линейная теория, максимальную — гипотеза спектрального суммирования.

Библиографический список

1. Труфяков В.И. Усталость сварных соединений конструкций. — Киев: Наукова думка, 1973. — 216 с.
2. Николаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций: Учеб. пособие. — М.: Высш. школа, 1982. — 272 с.
3. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: Справочник. 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1993. — 639 с.
4. Фирсанов В.В. Расчетные модели напряженного состояния тонкостенных авиационных конструкций с дискретными соединениями // Известия ТулГУ. 2014. Вып. 11. Ч. 1. С. 300-306.
5. Фирсанов В.В. Метод расчета напряженно-деформированного состояния систем с односторонними

- связями // Известия РАН: Механика твердого тела, 2003. № 1. С. 150-163.
6. Макаревский Д.И., Вышедкевич И.У., Будник Г.Д., Коротков М.О., Рыбаулин А.Г. О несущей способности сварных точек // Материалы XIX международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. 2013. Т.2. С. 30-32.
 7. Seung-Ho Han, Dae-Gyun An, Seong-Jong Kwak, Ki-Weon Kang. Vibration fatigue analysis for multi-point spot-welded joints based on frequency response changes due to fatigue damage accumulation // International Journal of Fatigue. 2013. Vol. 48, pp. 170-177.
 8. Стоев П.И., Мощенок В.И. Определение механических свойств металлов и сплавов по твердости // Вестник ХНУ им. Каразина. 2003. Т. 601. №2. С. 106-112.
 9. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. — М.: Машиностроение, 1979. — 191 с.
 10. ГОСТ 22762-77. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара. — М.: Издательство стандартов, 1978. — 12 с.
 11. Рыбаулин А.Г., Сидоренко А.С. Напряженное состояние конструкции авиационного изделия с дискретными сварными соединениями при случайном кинематическом нагружении // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 1. С. 183-193.
 12. Алямовский А.А. Компьютерное моделирование в инженерной практике. — СПб.: БВХ-Петербург, 2008. — 1040 с.
 13. Интерактивная справка Solidworks Premium 2015. URL: <http://help.solidworks.com> (дата обращения 03.02.2015).
 14. Langrand Bertrand, Markiewicz Eric. Strain-rate dependence in spot welds: Non-linear behaviour and failure in pure and combined modes I/II // International Journal of Impact Engineering 37, 2010. Pp. 792-805.
 15. Орлов Б.Д., Шавырин В.Н., Новосельцев Н.А. О прочности соединений из сплава Д16АТ, выполненных точечной сваркой. 2010. URL: <http://k-svarka.com/content/o-prochnosti-soiedinienii-iz-splava-d16at-vypolniennykh-tochiehnoi-svarkoi> (дата обращения 13.04.2014).
 16. Pan Ning, Sheppard Sheri D. Stress intensity factors in spot welds // Engineering Fracture Mechanics. 2003. Vol. 70. Issue 5, pp. 671-684.
 17. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти т. — М.: Машиностроение. — Т. 1. Колебания линейных систем / Под ред. В.В. Болотина, 1978. 352 с. — Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов / Под ред. Ф.М. Диментберга и К.С. Колесникова, 1980. 544 с.
 18. ГОСТ 25.101-83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. — М.: Издательство стандартов, 1984. — 21 с.
 19. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник. — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.
 20. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справочник в 2-х томах. — Киев: Наукова думка, 1987. — Т.1. 510 с.; Т.2. 825 с.
 21. ГОСТ 25.504-82. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. — М.: Издательство стандартов, 1982. — 55 с.
 22. Райхер В.Л. Гипотеза спектрального суммирования и ее применение для определения усталостной долговечности при действии случайных нагрузок. — М.: Труды ЦАГИ, 1969. Вып. 1134. — 40 с.
 23. Бессолова О.А., Райхер В.Л., Устинов А.С. Расчет усталостной повреждаемости при циклическом и случайном нагружении с ненулевым средним значением // Ученые записки ЦАГИ. 1989. Т. XX. № 3. С. 72-80.

TENSITY AND ENDURANCE OF A STRUCTURE WITH DISCRETE WELD BONDING UNDER STATIONARY RANDOM VIBRATIONS

Rybaulin A.G. *, Sidorenko A.S. **

*Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia*

* e-mail: artcomj@gmail.com

** e-mail: k906@mai.ru

Abstract

Discrete weld bonding are zones of increased stress concentration, formed due to heating non-uniformity during welding process and significant difference in mechanical characteristics of a metal in weld junctions

from those of a parent material. Under repeated loading action the occurrence of fatigue fractures evolved between weld materials at the contour of a weld point is most probable. The fatigue endurance of the structures with weld bonding is determined, for the most part, by

the stressed state dynamic characteristics at local zones of weld points. To obtain the proper durability estimation of such kind of structures one should define stressed state dynamic characteristics with allowance for its essential spatial non-uniformity and local changes in material properties.

The paper presents the technique and results of a structure with spot-welded joints subjected to random vibration probabilistic characteristics computation using finite elements simulation. Simulation of the dynamic stress state was executed for the structure under random kinematic loading conditions with the specified power spectral density function of acceleration. To substantiate the correctness of the simulation of spot-welded joints the authors studied by computation the samples of spot-welded joints, tested for static strength under tensile and shearing, and plotted vibrating stress spectral characteristics for various points of the structure. Zones and levels of maximum stresses were determined. Features of dynamic stress state in welded joints were revealed. Estimations of specific damageability and mean longevity of welded joints under various theories of accumulation of fatigue damages were obtained.

The attribute of the study consists in detailed modelling of dynamic stress state at welded joint considering significant changes of the properties of the parent material over spot weld cross section. The properties of the material at spot weld local zones are determined based on micro-hardness yield stress empirical dependences.

The developed technique and numerical simulation results can be applied to assess the vibration strength of thin-walled structures with discrete welded connections.

Keywords: discrete weld bonding, spot welding, random vibration, finite element simulation, dynamic tension, spectral density, fatigue strength, fatigue endurance.

References

1. Trufyakov V.I. *Ustalost' svarnykh soedinenii konstruktssii* (Fatigue of weld bondings of structures), Kiev, Naukova dumka, 1973, 216 p.
2. Nikolaev G.A., Kurkin S.A., Vinokurov V.A. *Svarnye konstruktssii. Prochnost' svarnykh soedinenii i deformatsii konstruktssii* (Welded structures. Strength of welded connection and structure deformation), Moscow, Vysshaya shkola, 1982, 272 p.
3. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. *Raschet na prochnost' detalei mashin* (Strength calculation of machine components), Moscow, Mashinostroenie, 1993, 639 p.
4. Firsanov V.V. *Izvestiya TulGU*, 2014, issue 11, part 1, pp. 300-306.
5. Firsanov V.V. *Izvestiia RAN: Mekhanika tverdogo tela*, 2003, no 1, pp. 150-163.
6. Makarevskii D.I., Vyshedkevich I.U., Budnik G.D., Korotkov M.O., Rybaulin A.G. *Materialy XIX mezhdunarodnogo simpoziuma "Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruktssii i sploshnykh sred" imeni A.G. Gorshkova*, 2013, vol. 2, pp. 30-32.
7. Seung-Ho Han, Dae-Gyun An, Seong-Jong Kwak, Ki-Weon Kang. Vibration fatigue analysis for multi-point spot-welded joints based on frequency response changes due to fatigue damage accumulation. *International Journal of Fatigue*, 2013, vol. 48, pp. 170-177.
8. Stoev P.I., Moshchenok V.I. *Vestnik KhNU im. Karazina*, 2003, vol. 601, no. 2, pp. 106-112.
9. Markovets M.P. *Opreделение mekhanicheskikh svoistv metallov po tverdosti* (Metals mechanical properties determination by hardness), Moscow, Mashinostroenie, 1979, 191 p.
10. *Metally i splavy. Metod izmereniya tverdosti na predele tekuchesti v davlivaniem shara, GOST 22762-77* (Metals and alloys. Yield point hardness test by ball indentation, State Standart 22762-77), Moscow, Standarty, 1978, 12 p.
11. Rybaulin A.G., Sidorenko A.S. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2013, vol. 20, no. 1, pp. 183-193.
12. Aliamovskii A.A. *Kompiyuternoe modelirovanie v inzhenernoi praktike* (Computer simulation in practical engineering), Saint Petersburg, BVKh-Peterburg, 2008, 1040 p.
13. *Solidworks Premium 2015*, available at: <http://help.solidworks.com> (accessed 03.02.2015).
14. Langrand Bertrand, Markiewicz Eric. Strain-rate dependence in spot welds: Non-linear behavior and failure in pure and combined modes I/II. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, vol. 37, pp. 792-805.
15. Orlov B.D., Shavyrin V.N., Novosel'tsev N.A. *O prochnosti soedinenii iz splava D16AT, vypolnennykh tochechnoi svarkoi*, 2010, available at: <http://k-svarka.com/content/o-prochnosti-soedinenii-iz-splava-d16at-vypolnennykh-tochiechnoi-svarkoi> (accessed 13.04.2014).
16. Pan Ning, Sheppard Sheri D. Stress intensity factors in spot welds. *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, vol. 70, issue 5, pp. 671-684.
17. Bolotin V.V. *Vibratsii v tekhnike* (Vibrations in equipment), Moscow, Mashinostroenie, vol. 1, 1978 - 353 p.; vol. 3, 1980 - 544 p.
18. *Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody skhematizatsii sluchainykh protsessov nagruzheniya elementov mashin i konstruktssii i statisticheskogo predstavleniya rezul'tatov, GOST 25.101-83* (Strength calculation and testing. Random processes of machine and structures elements loading schematizing methods and statistical results representation, State Standart 25.101-83), Moscow, Standarty, 1984, 21 p.
19. Kogaev V.P., Makhutov N.A., Gusenkov A.P. *Raschety detalei mashin i konstruktssii na prochnost' i dolgovechnost'*

- (Calculations of machine components and structures for strength and durability), Moscow, Mashinostroenie, 1985, 224 p.
20. Troshchenko V.T., Sosnovskii L.A. *Soprotivlenie ustalosti metallov i spлавov* (Fatigue resistance of metals and alloys), Kiev, Naukova dumka, 1987, vol. 1 - 510 p., vol. 2 - 825 p.
 21. *Metody rascheta kharakteristik soprotivleniya ustalosti, GOST 25.504-82* (Strength calculation and testing. Methods of fatigue strength behavior calculation, State Standart 25.504-82), Moscow, Standarty, 1982, 55 p.
 22. Raikher V.L. *Gipoteza spektral'nogo summirovaniya i ee primeneniye dlya opredeleniya ustalostnoi dolgovechnosti pri deistvii sluchainykh nagruzok* (Proceedings of TsAGI. Spectral summation hypothesis and its application to determine the fatigue life under random loading effect), Moscow, Trudy TsAGI, 1969, issue 1134, 40 p.
 23. Bessolova O.A., Raikher V.L., Ustinov A.S. *Uchenye zapiski TsAGI*, 1989, vol. XX, no. 3, pp. 72-80.